干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

不同初始盐分浓度下土壤盐结皮的形成过程及其对蒸发的影响机理

唐 洋[1,2,3]， 李新虎[1,2,3]， 郭 敏[1,2,3]， 王弘超[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆阿克苏绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 阿克苏 843017；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：土壤盐结皮对土壤水文过程具有重要影响，初始盐分浓度（Initial salt concentration, ISC）的差异会对盐结皮的形成过程产生不同程度的影响，从而导致土壤蒸发的差异。但目前不同ISC下盐结皮形成过程对土壤蒸发的影响机理尚不明确。因此，通过试验模拟与理论分析相结合，动态监测及分析不同ISC下砂土的盐结皮形成、蒸发、土壤表面温度动态变化过程，以期阐明不同ISC下盐结皮形成过程及其对土壤蒸发的影响机理。结果表明：ISC越高，盐结皮在土壤表面出现的时间越早，覆盖率越大，且在同样光照强度和光照时间条件下土表温度增幅越小，蒸发量也越小；对数函数能较好地拟合不同ISC与累积蒸发量之间的关系（R^2>0.90）；随着ISC的增加，盐结皮对土壤蒸发抑制效率从24.14%（10 g·L^{-1}）增大到71.99%（250 g·L^{-1}）。ISC会显著影响盐结皮形成的过程，并通过影响土表温度的变化进而导致土壤蒸发出现巨大差异。

关 键 词：初始盐分浓度；盐结皮；形成发育；土表温度；土壤蒸发

文章编号：

盐渍化会引起土壤退化，对环境与农业生产有重大影响，是我国西北干旱、半干旱区面临的主要生态环境问题之一[1-2]。在干旱、半干旱区，由于土壤水分的蒸发使得易溶性盐分聚集与地表土壤颗粒结晶胶结形成土壤盐结皮[3]。盐结皮具有含盐量高、硬度大等特点，对土壤水文、土壤风蚀过程、植被分布等具有重要影响，引起国内外学者的广泛关注[4]。土壤蒸发是水分循环的重要组成部分，明确土壤蒸发过程及机理对于精确定量描述干旱区水分循环过程有着重要的理论和实际意义。由于干旱区盐结皮广泛分布，因此揭示盐结皮土壤的蒸发过程及机理也成为热点问题。

国内外针对盐结皮对土壤蒸发的影响进行了大量的研究，例如：Shimojima等[5]研究发现，在10 g·L^{-1} NaCl溶液处理下，不同多孔介质（砂、玻璃珠）的蒸发分别比无盐处理的蒸发低了70%和30%。Nassar等[6]对比压实与松散土壤分别在1.11 mol·kg^{-1} KCl溶液与蒸馏水处理下的蒸发速率，发现有盐处理下压实与松散土壤蒸发分别下降了5%与22%。Li等[7]研究发现，20 g·L^{-1} NaCl溶液处理下的土壤蒸发相比无盐处理下降了60%。Chen[8]对比20 g·L^{-1} NaCl溶液处理与无盐处理，发现有盐处理下蒸发降低了98%。Nachshon等[9]研究发现，50 g·L^{-1} NaCl溶液处理下细砂的蒸发相对于无盐处理下降了17%。上述研究结果差异虽然较大，但均表明盐结皮对土壤蒸发具有明显的抑制作用，部分研究中盐结皮对水分蒸发的抑制甚至高于其他研究数倍。部分研究[10-12]发现溶液初始盐分浓度（Initial salt concentration, ISC）越高，盐结皮出现在土壤表面的时间越早，盐结皮覆盖率增长越快。本文作者据此假设ISC越高，盐结皮对土壤蒸发的影响越早且越大。此外，盐结皮会对土表温度有显著影响，进一步影响土壤蒸发[13]，但是目前有关盐结皮对土表温度的影响还存在争议。有学者[14-16]认为盐结皮会导致土壤反照率的增

收稿日期：2021-09-28； **修订日期**：2021-12-01
基金项目：由西部青年学者项目（2020-XBQNXZ-012）；国家自然科学基金项目（41977013）资助
作者简介：唐洋（1997-），女，硕士研究生，主要从事土壤盐渍化等方面的研究. E-mail: tangyang19@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：李新虎（1981-），男，副研究员，主要从事土壤盐渍化与土壤水盐运动等方面的研究. E-mail: lixinhu@ms.xjb.ac.cn

加，减少能量输入，引起土表温度降低。而另一部分学者[17-18]认为，盐结皮形成过程中会释放热量，增大能量输入，引起土表温度升高。

尽管国内外针对盐结皮对蒸发的影响进行了大量的研究，但是由于试验条件不一致（例如ISC），导致研究结果差异较大，盐结皮对温度的影响仍存在争议。目前，缺乏对不同ISC下盐结皮对土壤蒸发的系统研究。因此，本文设置不同ISC，动态监测及分析不同ISC处理下砂土的盐结皮形成、蒸发、土表温度变化规律，结合试验研究与理论分析，明确不同ISC下盐结皮形成过程及其对土壤蒸发的影响，以期拓展对盐渍化土壤蒸发过程的理解，为土壤演化过程和水分循环的定量描述提供理论基础和参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤取自新疆塔里木盆地北缘（40°39′N、80°49′E），其中粉粒、砂粒和黏粒分别占8.43%、91.33%和0.24%。按美国农业部制土壤分类标准，供试土壤质地为砂土，中值粒径D50=100.63 μm，土壤容重为1.56 g·cm^{-3}，饱和导水率为440.37 cm·d^{-1}，饱和含水率为39.67%（σ=0.55%）。

首先用自来水自下而上清洗供试土壤，当电导率稳定在600 μS·cm^{-1}左右（自来水电导率）时，改用蒸馏水自下而上缓慢洗去供试土壤盐分（电导率小于50 μS·cm^{-1}）。将洗好后的供试土壤风干、过2 mm筛，均匀填装在亚克力管内（高35 cm，内径10 cm）（图1），在亚克力管底部5 cm填充滤石（直径4~6 mm）。设置6个ISC水平处理，分别为0 g·L^{-1}（对照）、10 g·L^{-1}、40 g·L^{-1}、80 g·L^{-1}、150 g·L^{-1}与250 g·L^{-1} NaCl溶液，每个处理设置3个重复（共18个土柱）。利用不同ISC的溶液自下往上对土柱进行缓慢饱和，待到溶液漫过土壤表面后，停止水分流入，再封住土壤表面以减小蒸发，打开土柱上部阀门，充分饱和48 h，以保证气泡充分排出。饱和完成后，打开土柱下部阀门，溶液缓慢流尽，此时土柱初始饱和完成。所有土柱外部均包裹一层隔热膜，以减少外界温度对土壤温度的影响。土表上方38 cm处均有一盏卤素灯（50 W）用于提供热量驱动蒸发。蒸发过程通过自动称重平台（型号WP20，北京时域通科

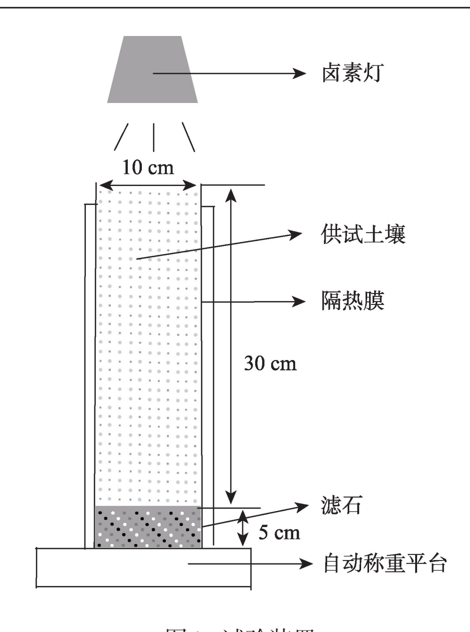


图1 试验装置

Fig. 1 Experiment setup

技有限公司）测定，将自动称重平台连接到数据采集器（型号i-logger，北京时域通科技有限公司）记录数据，数据采集间隔为5 min，整个试验周期为25 d。试验过程中，利用数码相机（型号ILCE-6000，索尼数字产品有限公司）与红外热成像仪（型号FLIR T540）于每天10:00、14:00与22:00拍照，从而动态监测土壤表面盐结皮覆盖面积与土表温度动态变化过程[19]。

利用FLIR Tools软件处理红外照片，得到土壤表面温度，用ImageJ软件计算盐结皮覆盖率[19]。试验结束后，将土壤表面的盐结皮分离、溶解、过滤后称重得到最终盐结皮含盐量。

蒸发抑制效率是指在土壤蒸发过程中某些指标抑制土壤水分蒸发的能力[14,20-21]。本研究引入抑制效率来衡量不同处理下盐结皮对土壤水分蒸发的抑制作用。试验期间土壤日蒸发量、累积蒸发量和蒸发抑制效率计算方法如下：

$$\mathrm{ED}_t = M \times 10/(\rho_w \times r^2 \times \pi) \tag{1}$$

$$\mathrm{EC}_t = \sum \mathrm{ED}_t \tag{2}$$

$$I = 100\% \times (\mathrm{EC}_0 - \mathrm{EC}_t)/\mathrm{EC}_0 \tag{3}$$

式中：ED_t为第t天的土壤日蒸发量（mm）；t为蒸发天数（d）；M为日蒸发质量（当日土柱质量与次日土柱质量之差）（g）；ρ_w为水的密度（1 g·cm^{-3}）；r为亚克力管的半径（cm）；EC_t为第t天的土壤累积蒸发量（mm）；I为盐结皮对土壤蒸发的抑制效率（%）；EC_0为对照土壤累积蒸发量（mm）。

1.2　数据处理

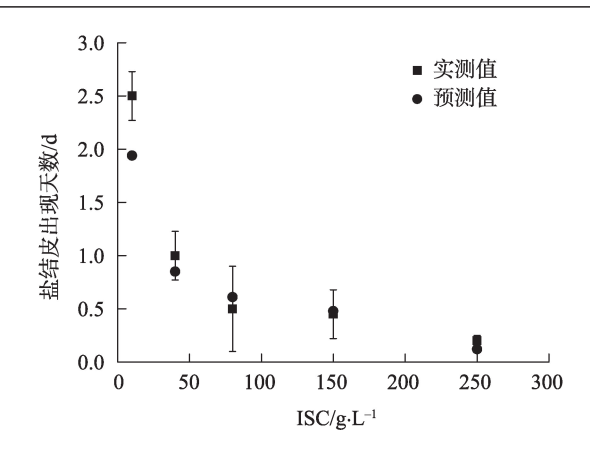
使用Excel 2016与SPSS 26软件进行统计分析，采用独立样本t检验进行处理间的差异显著性检验（α=0.05），使用Origin 2018绘图。

2　结果与分析

2.1　不同初始盐分浓度下盐结皮形成发育过程

由图2可知，ISC越高，盐结皮越早出现，且盐结皮覆盖率增长越快。盐结皮的演化过程可分为3个阶段：第1阶段，少量的盐分结晶在土壤表面出现，且随着ISC的升高，盐分结晶出现在土表的天数越早，分别为2.5 d、1 d、0.5 d、0.45 d和0.2 d，而对照处理一直无盐分结晶出现；第2阶段，盐结皮迅速增长，随着ISC的升高，盐结皮覆盖率越快达到相对稳定状态（盐结皮覆盖率增长速率很低），且达到相对稳定状态时的盐结皮覆盖率越大。10~250 g·L^{-1}处理达到相对稳定时的覆盖率分别为4.04%、48.99%、89.72%、90.12%和98.39%，天数分别为9 d、6 d、5 d、5 d和2 d；第3阶段，盐结皮相对稳定，10 g·L^{-1}与40 g·L^{-1}处理下盐结皮覆盖率保持相对稳定，但80~250 g·L^{-1}处理在蒸发12 d、14 d和10 d后，盐结皮发生破裂，覆盖率略有下降。10~250 g·L^{-1}处理下盐结皮所含盐分分别为1.13 g、5.57 g、14.00 g、16.23 g和21.97 g。

盐结皮出现在土表天数的预估值见图3（R^2=0.7385）。由图3可知，ISC越高，盐结皮出现在土表的时间就越早。



注：ISC为初始盐分浓度。下同。

图3　不同初始盐分浓度下盐结皮出现天数的实测值与预测值

Fig. 3　Measured value and predicted value of days of salt crust under different initial salt concentrations

2.2　不同初始盐分浓度下土壤蒸发过程

2.2.1　土壤日蒸发过程　由图4可知，除了10 g·L^{-1}与40 g·L^{-1}处理，其他处理间的土壤日蒸发量均差异显著（P<0.05）。随着天数的变化，对照和有盐处理下土壤日蒸发量均呈下降趋势，且日蒸发量变化过程均可分为3个阶段，但3个阶段所对应的土壤蒸发过程存在较大差异。对照处理下土壤蒸发的第1阶段（S1）为1~8 d，此阶段土壤供水能力可充分满足蒸发需求，土壤表面始终保持湿润，故此阶段日蒸发量恒定且较高，日均蒸发量为7.43 mm·d^{-1}；9~17 d为第2阶段（S2），该阶段土壤的供水能力已

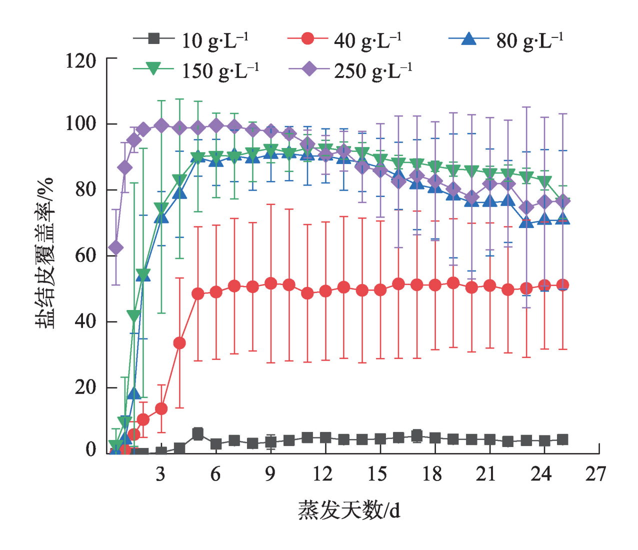


图2　不同初始盐分浓度下土壤盐结皮覆盖率的变化过程

Fig. 2　Variation process of soil salt crust coverage under different initial salt concentrations

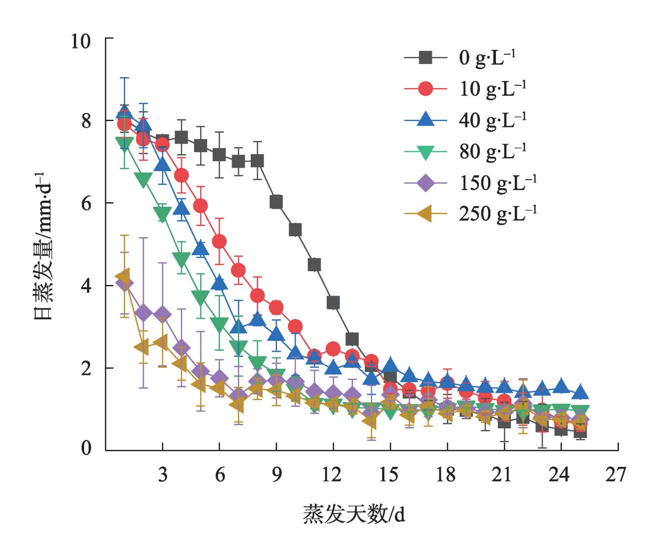


图4　不同初始盐分浓度下土壤日蒸发量的变化过程

Fig. 4　Variation process of soil daily evaporation under different initial salt concentrations

无法满足蒸发需求，大部分浅层毛管水断裂，日蒸发量由6.03 mm·d^{-1}迅速降至1.10 mm·d^{-1}；第3阶段(S3)为18~25 d，此时浅层土体内的毛管孔隙完全断裂，土壤表面完全干燥，土壤蒸发以水汽扩散为主，日蒸发量从1.00 mm·d^{-1}降至0.46 mm·d^{-1}，且逐渐趋于稳定。

有盐处理下的土壤蒸发过程也可分为3个阶段，可以被Nachshon等定义的有盐土壤3个蒸发阶段(SS1~SS3)所描述。表1为不同ISC下有盐土壤3个蒸发阶段的天数。相对于无盐蒸发，第1阶段(SS1)的天数较短，且随着ISC的升高，SS1阶段的天数缩短，由3 d(10 g·L^{-1})减短至0.30 d(250 g·L^{-1})。由于溶质势的降低(除了250 g·L^{-1})，SS1阶段的土壤蒸发呈缓慢下降的趋势，此阶段土壤表面出现盐分结晶(溶液饱和析出导致，图2)。由于盐结皮的形成，第2阶段(SS2)的土壤日蒸发量迅速下降，且

表1 不同初始盐分浓度下有盐处理土壤蒸发阶段的天数

Tab. 1 Days of soil evaporation stage with salt treatment under different initial salt concentrations

ISC/g·L^{-1}	天数/d		
	SS1阶段	SS2阶段	SS3阶段
10	3	11	11
40	2	10	13
80	1	9	15
150	0.63	8	16.37
250	0.30	7	17.70

注：ISC为初始盐分浓度；SS1~SS3分别为有盐土壤蒸发第1至第3阶段。下同。

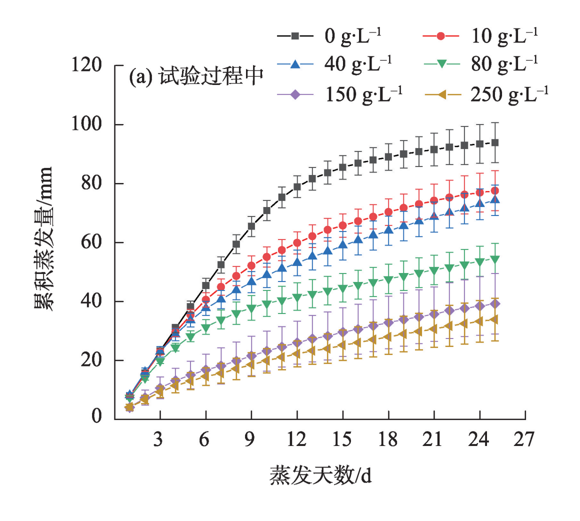
ISC越高，SS2阶段的天数就越短，日蒸发量下降越迅速。此阶段盐结皮覆盖率越快达到相对稳定状态，且达到相对稳定状态时的盐结皮覆盖率越大(图2)。SS2阶段不同有盐处理下土壤日蒸发量分别由7.41 mm·d^{-1}、7.88 mm·d^{-1}、7.47 mm·d^{-1}、4.06 mm·d^{-1}和4.22 mm·d^{-1}降至2.15 mm·d^{-1}、1.97 mm·d^{-1}、1.49 mm·d^{-1}、1.68 mm·d^{-1}和1.11 mm·d^{-1}(图4)。SS3阶段不同有盐处理下平均日蒸发量分别为1.21 mm·d^{-1}、1.64 mm·d^{-1}、1.02 mm·d^{-1}、1.14 mm·d^{-1}和1.01 mm·d^{-1}，此时土壤蒸发以水汽扩散为主，水汽通过盐结皮向外界扩散，蒸发量相对稳定并且较低。

2.2.2 土壤累积蒸发量 由图5a可知，土壤累积蒸发量随着天数的推移而逐渐增大，但是累积蒸发增加量不断减少。由图5b可知，随着ISC的增加，土壤累积蒸发量降低。0~250 g·L^{-1}处理下土壤累积蒸发量分别为93.86 mm、77.55 mm、74.33 mm、54.63 mm、39.23 mm与33.92 mm。ISC由0 g·L^{-1}增加到250 g·L^{-1}时，土壤累积蒸发量下降了63.86%。ISC由40 g·L^{-1}增加到80 g·L^{-1}时，土壤累积蒸发量下降了26.50%，而ISC由150 g·L^{-1}增加到250 g·L^{-1}时，土壤累积蒸发量仅下降了13.54%。不同ISC与累积蒸发量呈对数关系(R^2>0.90)。

用对数函数对蒸发天数(t>1)与累积蒸发量(EC_t)进行拟合，计算公式如下：

$$EC_t = a \times \ln(t), \quad t > 1 \qquad (4)$$

式中：a为对数函数拟合参数，其他符号的意义同上。



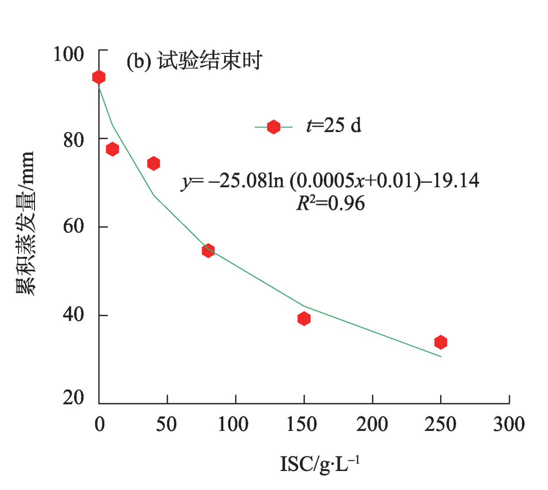


图5 不同初始盐分浓度下土壤的累积蒸发量

Fig. 5 Cumulative evaporation of soil under different initial salt concentrations

由表2可知，不同ISC下拟合度均较好（R^2>0.90），且ISC越高，参数a越小，累积蒸发量也越小。为了对不同ISC下土壤的累积蒸发量进行预测，需进一步对参数a与ISC的关系进行回归分析，公式如下：

$$a = 3156/(110.3 + \mathrm{ISC}), \quad R^2 = 0.9698 \tag{5}$$

将上式代入式（4）中，得到土壤累积蒸发量随蒸发天数（t）与初始盐分浓度（ISC）变化函数：

$$\mathrm{EC}_t = 3156 \times \ln(t)/(110.3 + \mathrm{ISC}), \quad t > 1 \tag{6}$$

当t=1时，ISC与EC_1呈现指数函数关系，公式如下：

$$\mathrm{EC}_1 = 8.264 \times \mathrm{EXP}(-0.0024 \times \mathrm{ISC}), \quad R^2 = 0.9208 \tag{7}$$

综上分析，土壤累积蒸发量随蒸发天数（t）与初始盐分浓度（ISC）变化的函数为：

$$\begin{cases} \mathrm{EC}_1 = 8.264 \times \mathrm{EXP}(-0.0024 \times \mathrm{ISC}), & t = 1 \\ \mathrm{EC}_t = 3156 \times \ln(t)/(110.3 + \mathrm{ISC}), & t > 1 \end{cases} \tag{8}$$

表2　对数函数拟合参数与决定系数

Tab. 2　Logarithmic function fitting parameters and determination coefficient

ISC/g·L^{-1}	对数函数拟合参数(a)	决定系数(R^2)
0	29.95	0.9630
10	24.03	0.9877
40	22.03	0.9829
80	16.81	0.9796
150	11.10	0.9477
250	9.52	0.9421

2.2.3　土壤蒸发抑制效率　由图6可知，蒸发抑制效率随着ISC的增加而增大。随着蒸发天数的增加，不同ISC下的蒸发抑制效率均先增大再减小。10~250 g·L^{-1}处理下蒸发抑制效率分别在12 d、12 d、14 d、11 d和11 d达到最大，且分别为24.14%、32.76%、47.76%、62.29%和71.99%。综上所述，在试验期内，有盐处理下土壤蒸发均受到了抑制，且ISC越高，形成的盐结皮对土壤蒸发的抑制作用越明显。

2.3　不同初始盐分浓度下土表温度变化

由图7可以看出，由于持续的光照，土表温度均随着蒸发天数的延长而升高。在对照处理S1阶段，土表温度缓慢上升（0.13 ℃·d^{-1}），此时日蒸发量恒定且较高；在S2阶段，土表温度增幅加快（0.38 ℃·d^{-1}），此时日蒸发量迅速下降；在S3阶段，土表温度增幅更快（0.93 ℃·d^{-1}），此时土壤表面完全干燥，日蒸发量相对稳定且较低。有盐处理下SS2阶段，土表温度缓慢上升，且ISC越高，土表温度增幅越小，10~250 g·L^{-1}处理下土表温度增幅分别为0.72 ℃·d^{-1}、0.29 ℃·d^{-1}、0.21 ℃·d^{-1}、0.28 ℃·d^{-1}和0.12 ℃·d^{-1}，此时日蒸发量迅速下降；SS3阶段，土表温度也在缓慢上升，但增幅较SS2阶段有所下降，10~250 g·L^{-1}处理下土表温度增幅分别为0.49 ℃·d^{-1}、0.08 ℃·d^{-1}、0.25 ℃·d^{-1}、0.06 ℃·d^{-1}和0.09 ℃·d^{-1}，此时日蒸发量恒定且较低。0~250 g·L^{-1}处理下蒸发天数与土表温度之间均呈明显的正相关关系（R^2>0.70，图7）。不同处理下斜率0 g·L^{-1}>10 g·L^{-1}>40 g·L^{-1}>80 g·L^{-1}>150 g·L^{-1}>250 g·L^{-1}，因此ISC越高，土表温度增幅越小。

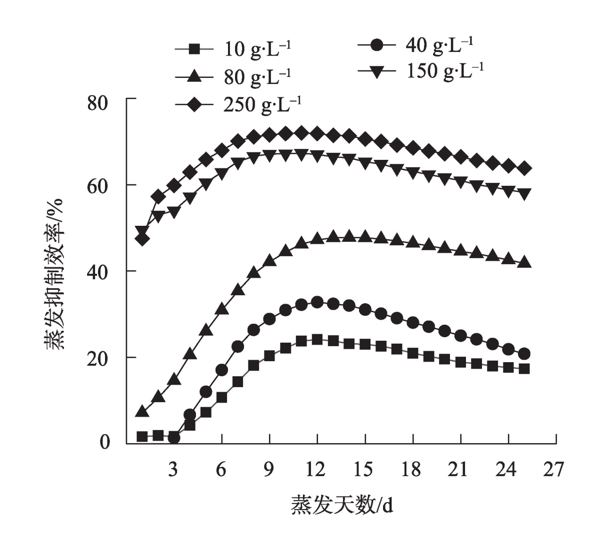


图6　不同初始盐分浓度下蒸发抑制效率的动态变化

Fig. 6　Dynamic changes of evaporation inhibition efficiency under different initial salt concentrations

3　讨　论

本研究无盐处理下蒸发过程能够被经典的3个蒸发阶段所描述，现有研究对于蒸馏水处理的蒸发描述争议很小[9,22-23]。本研究有盐处理下蒸发阶段与Nachshon等[9]定义的有盐土壤3个蒸发阶段一致。第1阶段（SS1）由于溶质势的降低，蒸发速率缓慢下降；第2阶段（SS2），由于盐结皮的形成，蒸发速率迅速下降；第3阶段（SS3）水汽通过盐结皮扩散，蒸发速率稳定较低。现有研究对于有盐处理下蒸发过程描述有较大的差异，Shokri-Kuehni等[17]发现有盐土壤蒸发应分为4个阶段，其中第2阶段土壤

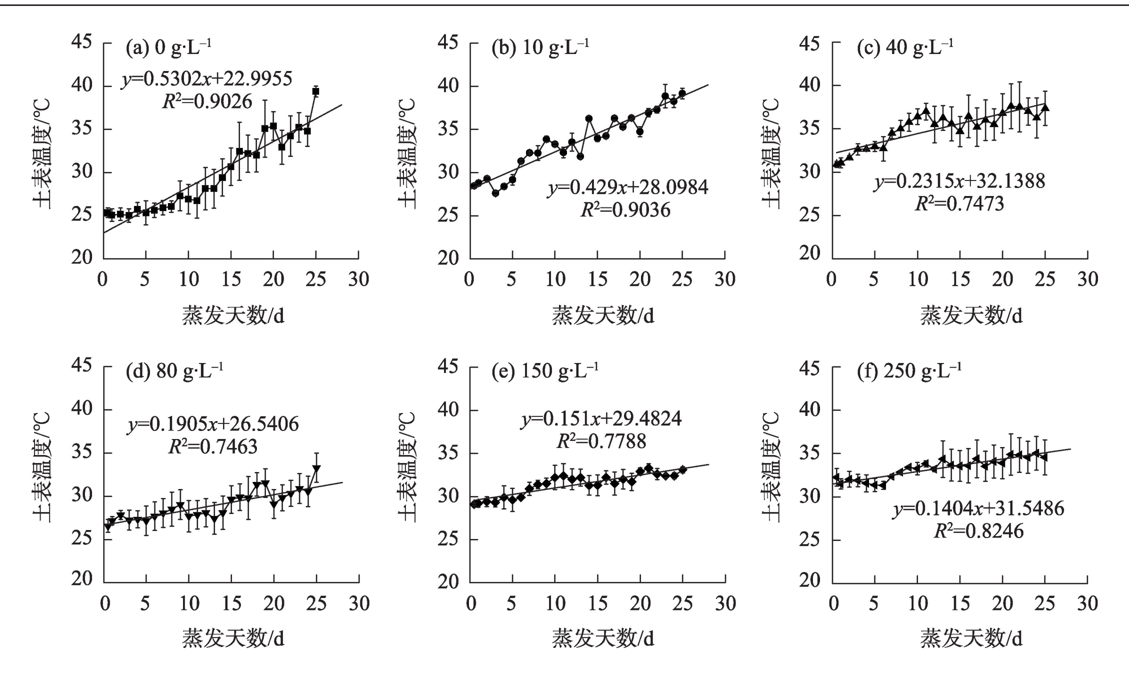


图7 不同初始盐分浓度下土表温度的变化

Fig. 7 Variation of soil surface temperature under different initial salt concentrations

蒸发速率恒定。Li等[7]定义了有盐土壤蒸发的4个阶段，SS1阶段蒸发速率先恒定较高再缓慢下降，SS2阶段蒸发速率缓慢降低，SS3阶段蒸发速率迅速下降，SS4阶段蒸发速率缓慢下降。本试验有盐土壤的蒸发过程符合Nachshon等定义的蒸发阶段的原因主要为本试验与Nachshon等试验均为初始饱和试验，无持续供水，土壤逐渐干燥。而Li等[7]试验为持续供水试验，土壤一直保持湿润。

本研究表明，随着ISC的升高，蒸发速率越小，这与前人研究结果一致。钱峰等[24]发现，随着ISC的升高，蒸发强度降低，但是该研究并没有报道是否有盐结皮出现，也没有分析盐结皮对蒸发的影响；王华军等[25]开展了饱和含盐砂土的高温蒸发实验，研究发现ISC越高，毛细蒸发速率（土壤从蒸发开始时刻至表层首次出现干燥区时间段内的平均水分蒸发速率）越小；Li等[26]在对不同NaCl盐分浓度下粉黏土蒸发变化的研究发现，短时间内，250 g·L⁻¹处理下土壤表面盐结皮迅速形成，导致蒸发速率显著低于其他处理，但该试验并未对盐结皮动态演变过程进行分析。上述研究均表明ISC越高，蒸发速率越小，但都没有考虑盐结皮的动态演变过程。而本研究表明，ISC会显著影响盐结皮形成的过程，并影响土表温度的变化，从而导致土壤蒸发出现巨大差异。

本研究有盐土壤蒸发第1阶段（SS1），由于溶质势降低，饱和蒸汽压减小，导致蒸发速率缓慢下降，这与前人研究相似[9,27]。在SS1阶段，盐结皮出现在土壤表面，这与Li等[7]和Jambhekar等[27]研究结果一致。ISC越高，土壤表层溶液越快达到饱和浓度，盐分结晶析出，盐结皮越快出现在土表，SS1阶段的天数越短，越早进入以盐结皮蒸发阻力为主的SS2阶段，这与前人研究相符[11,27]。Fujimaki等[15]研究表明，由于溶质势在达到饱和浓度后不会进一步降低，因此蒸发速率进一步减小都可归因于盐结皮的蒸发阻力。

本研究中，随着ISC升高，盐结皮覆盖率增长越迅速，这与Rad等[12]研究结果一致。在SS2阶段，由于盐结皮的形成，蒸发速率迅速下降，这与Nachshon等[9]研究结果一致。随着ISC升高，盐结皮覆盖率增大，SS2阶段的天数减短，蒸发速率下降越迅速。多项研究表明，盐结皮可显著抑制土壤蒸发，其作用类似覆盖秸秆或者砾石[28–33]。Eloukabi等[10]研究表明，蒸发主要发生在土表未被盐结皮覆盖的部分，盐结皮覆盖面积越大，蒸发速率越小。随着ISC的升高，累积盐分增多，土壤孔隙被结晶堵塞，导致土壤孔隙度减小，进而引起盐结皮厚度与盐结皮阻力增大[15,34–36]。据此分析本研究不同ISC下SS2阶段土壤蒸发出现巨大差异的原因是随着ISC升高，盐结皮覆盖率增长速率加快，且覆盖率增大，引起盐结皮阻力增大，导致蒸发速率进一步下降。

本研究不同ISC下SS3阶段与Nachshon等[9]研究一致，此时土壤蒸发以水汽扩散为主，水汽通过盐结皮向外界扩散，蒸发量相对稳定并且较低。试验结束时，不同ISC下水蒸汽通过盐结皮的扩散系数比环境温度下水蒸汽在空气中的扩散系数($2.26\times10^{-5}\ m^2\cdot s^{-1}$)小了1~2个数量级[37]。由此可见，盐结皮对水蒸汽扩散的抑制作用是导致有盐土壤蒸发量下降的主要原因之一[25]。

本文试验中，蒸发抑制效率在蒸发后期下降，而Li等[7]研究结果表明，在持续供水条件下，蒸发后期抑制效率未下降。出现这一差异的原因可能是本文试验未进行持续供水处理。随着蒸发的进行，土壤逐渐干燥。无盐土壤在蒸发前中期累积蒸发量大，导致上层干土的厚度增大，蒸汽扩散阻力变大，而有盐土壤在蒸发前中期的累积蒸发量小于无盐蒸发，上层干土厚度小于无盐处理，即使加上盐结皮阻力，后期有盐土壤日蒸发量仍大于无盐土壤(图4)，因此蒸发后期抑制效率有所下降。

土壤温度是土壤蒸发的影响因素之一，而盐结皮会对土表温度有所影响[15,17]。本文试验中，随着ISC的升高，土表温度增幅减小，这与Fujimaki等[15-16]研究结果一致。Fujimaki等[15-16]认为盐结皮会增大土壤反照率，从而导致土表温度下降，且土壤反照率与土表的积盐量成正比。但Nachshon等[18]则认为盐结皮会增大土表温度，这与本文试验结果不一致。产生上述差异的原因可能是本文试验与Fujimaki等试验条件类似，都是在辐射条件下进行的，而Nachshon等试验是在非辐射条件下进行的。盐结皮形成过程中所释放的能量远小于持续光照的辐射能量，故其作用远低于盐结皮形成过程中土壤反照率增大的影响，从而导致土表温度增幅下降。而ISC越高，盐结皮出现在土壤表面的时间越早，盐结皮覆盖率增长越迅速，且覆盖率也越大，单位体积土壤含盐量越大[10]。因此随着ISC的升高，土壤反照率增大，从而减小能量输入，引起土表温度增幅减小，导致土壤蒸发降低。

4 结 论

本文通过室内模拟试验，分析了不同ISC下盐结皮在土壤表面的动态变化过程以及盐结皮形成发育过程对土壤蒸发的影响。主要结论如下：盐结皮在土壤蒸发过程中会阻碍水汽扩散，提供额外的盐结皮蒸发阻力，从而抑制了蒸发。随着ISC的升高，盐结皮越早形成，盐结皮厚度与覆盖比率越大，土表累积盐分越多，导致对蒸发的抑制效率越大，土表温度增幅越小，对蒸发的抑制也越显著。不同ISC下累积蒸发量之间的关系呈现非线性关系(对数关系，$R^2>0.90$)。本研究验证了盐分初始浓度对结皮形成过程影响显著，导致了蒸发和土表温度表现出巨大差异，因此建议在定量分析高盐土壤的水热传输过程时，盐分的初始浓度及其导致的盐结皮的特征差异不能被忽略。

参考文献(References)

[1] Wang J Z, Wu J L, Jia H J. Analysis of spatial variation of soil salinization using a hydrochemical and stable isotopic method in a semiarid irrigated basin, Hetao Plain, Inner Mongolia, north China[J]. Environmental Processes, 2016, 3(4): 723–733.

[2] Shokri-Kuehni S M S, Raaijmakers B, Kurz T, et al. Water table depth and soil salinization: From pore-scale processes to field-scale responses[J]. Water Resources Research, 2020, 56(2): 599–609.

[3] 李诚志. 土壤风蚀环境下盐结皮研究及展望[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 402–408. [Li Chengzhi. A review: The formation, development and prospect of soil salt crust on the view of soil erosion[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 402–408.]

[4] 张建国, 马爱生, 徐新文, 等. 土壤盐结皮研究进展与展望[J]. 陕西农业科学, 2013, 59(4): 146–149. [Zhang Jianguo, Ma Aisheng, Xu Xinwen, et al. Research progress and prospect of soil salt crust[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2013, 59(4): 146–149.]

[5] Shimojima E, Yoshioka R, Tamagawa I. Salinization owing to evaporation from bare-soil surfaces and its influences on the evaporation[J]. Journal of Hydrology, 1996, 178(1–4): 109–136.

[6] Nassar I N, Horton R. Salinity and compaction effects on soil water evaporation and water and solute distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 752–758.

[7] Li X, Shi F. Effects of evolving salt precipitation on the evaporation and temperature of sandy soil with a fixed groundwater table [J]. Vadose Zone Journal, 2021, 20(3): e20122, doi: 10.1002/VZJ2.20122.

[8] Chen X Y. Evaporation from a salt-encrusted sediment surface-field and laboratory studies[J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30(4): 429–442.

[9] Nachshon U, Weisbrod N, Dragila M I, et al. Combined evaporation and salt precipitation in homogeneous and heterogeneous porous media[J]. Water Resources Research, 2011, 47(3): 980–990.

[10] Eloukabi H, Sghaier N, Ben Nasrallah S, et al. Experimental study of the effect of sodium chloride on drying of porous media: The crusty-patchy efflorescence transition[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56(1−2): 80−93.

[11] Eloukabi H, Sghaier N, Prat M, et al. Drying experiments in a hydrophobic model porous medium in the presence of a dissolved salt [J]. Chemical Engineering & Technology, 2011, 34(7): 1085−1094.

[12] Rad M N, Shokri N. Nonlinear effects of salt concentrations on evaporation from porous media[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(4): 4403, doi: 10.1029/2011gl050763.

[13] Gran M, Carrera J, Massana J, et al. Dynamics of water vapor flux and water separation processes during evaporation from a salty dry soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3−4): 215−220.

[14] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 极端干旱区咸水滴灌林地盐结皮对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 34−39. [Zhang Jianguo, Xu Xinwen, Lei Jianqiang, et al. Effects of salt crust on soil evaporation condition with saline-water drip-irrigation in extreme arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 34−39.]

[15] Fujimaki H, Shimano T, Inoue M, et al. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(4): 1246−1256.

[16] Fujimaki H, Shiozawa S, Inoue M. Effect of salty crust on soil albedo[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003, 118(1−2): 125−135.

[17] Shokri-Kuehni S M S, Vetter T, Webb C, et al. New insights into saline water evaporation from porous media: Complex interaction between evaporation rates, precipitation, and surface temperature [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(11): 5504−5510.

[18] Nachshon U, Shahraeeni E, Or D, et al. Infrared thermography of evaporative fluxes and dynamics of salt deposition on heterogeneous porous surfaces[J]. Water Resources Research, 2011, 47 (12): W12519, doi: 10.1029/2011WR010776.

[19] Li X, Shi F. The effect of flooding on evaporation and the groundwater table for a salt-crusted soil[J]. Water, 2019, 11(5): 1003, doi: 10.3390/w11051003.

[20] 姜海波, 唐凯, 何新林. 抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 119−124. [Jiang Haibo, Tang Kai, He Xinlin. Experimental study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 119−124.]

[21] 张建国, 李红伟, 李雅菲, 等. 土壤盐结皮人工培育及其破损程度对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 138−144. [Zhang Jianguo, Li Hongwei, Li Yafei, et al. Artificial cultivation of soil salt crust and effects of its damage rate on soil evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 138−144.]

[22] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [Shao Ming'an, Wang Quanjiu, Huang Mingbin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.]

[23] Peter, Lehmann, Shmuel, et al. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media[J]. Physical Review E, 2008, 77(5): 056309, doi: 10.1103/PhysRevE.77.056309.

[24] 钱峰, 程冬兵, 刘静君. 土壤蒸发强度随土壤溶液盐分的变化研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 50−53. [Qian Feng, Cheng Dongbing, Liu Jingjun. Variation of evaporation intensity with salinity in soil solution[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(3): 50−53.]

[25] 王华军, 路俊超, 齐承英. 饱和含盐土壤高温蒸发速率及影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2165−2170. [Wang Huajun, Lu Junchao, Qi Chengying. Evaporation rates in saturated saline soils at high temperatures and its influencing factors[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(11): 2165−2170.]

[26] Li X W, Zhou J L, Jin M G, et al. Experiments on evaporation of high-TDS phreatic water in an arid area[J]. Advanced Materials Research, 2012, 446−449: 2815−2823.

[27] Jambhekar V A, Helmig R, Schroder N, et al. Free-flow-porous-media coupling for evaporation-driven transport and precipitation of salt in soil[J]. Transport in Porous Media, 2015, 110(2): 251−280.

[28] Rose D A, Konukcu F, Gowing J W. Effect of watertable depth on evaporation and salt accumulation from saline groundwater[J]. Soil Research, 2005, 43(5): 565−573.

[29] 莫治新, 韩飞, 马萍, 等. 不同盐结皮覆盖对土壤水分时空动态的影响[J]. 北方园艺, 2017(11): 175−178. [Mo Zhixin, Han Fei, Ma Ping, et al. Effect of salt crust on patio-temporal distribution of soil moisture in different thickness[J]. Northern Horticulture, 2017 (11): 175−178.]

[30] Malek E, Bingham G E, McCurdy G D. Evapotranspiration from the margin and moist playa of a closed desert valley[J]. Journal of Hydrology, 1990, 120(1−4): 15−34.

[31] Tyler S W, Kranz S, Parlange M B, et al. Estimation of groundwater evaporation and salt flux from Owens Lake, California, USA[J]. Journal of Hydrology, 1997, 200(1−4): 110−135.

[32] Malek E. Microclimate of a desert playa: Evaluation of annual radiation, energy, and water budgets components[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(3): 333−345.

[33] Kampf S K, Tyler S W, Ortiz C A, et al. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1−4): 236−252.

[34] 刘涛涛, 王勇辉, 阿迪拉·阿布力米提. 盐结皮对艾比湖湿地土壤特性的影响及其自然要素分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(3): 285−296. [Liu Taotao, Wang Yonghui, Ablimiti Adila. The effects of salt crust on soil property and the influencing natural factors in the Aibi Lake Wetland[J]. Earth and Environment, 2021, 49(3): 285−296.]

[35] 莫治新. 盐结皮对土壤有机质和水分积累的影响[J]. 环境保护科学, 2015(3): 120−121. [Mo Zhixin. Effect of salt crust on soil or-

ganic and moisture accumulation[J]. Environmental Protection Science, 2015(3): 120−121.]

[36] 王世明, 范敬龙, 赵英, 等. 咸水灌溉条件下塔里木河下游沙漠土壤水盐运移数值模拟[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1104−1113. [Wang Shiming, Fan Jinglong, Zhao Ying, et al. Numerical simulation of water and salt migration in desert soil in the lower reaches of Tarim River under salt-water irrigation[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1104−1113.]

[37] Hillel D. Soil and water: Physical principles and processes[M]. New York: Academic Press, 1971.

Formation process of soil salt crust and its influence mechanism on evaporation under different initial salt concentrations

TANG Yang[1,2,3], LI Xinhu[1,2], GUO Min[1,2,3], WANG Hongchao[1,3]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station of Aksu Oasis Farmland Ecosystem, Aksu 843017, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The effects of soil salt crusts on the soil hydrological process have gained considerable attention. Soil salt crusts have an important effect on the soil hydrological process. The formation process of salt crusts treated with different initial salt concentrations is substantially different, resulting in the difference of soil evaporation. However, the influence of salt crust formation on soil evaporation under different initial salt concentrations is not well understood. Therefore, this study theoretically and experimentally monitored and analyzed the changes in salt crust formation, evaporation, and soil surface temperature of sandy soil under irrigation water treatment with different initial salt concentrations to clarify the soil salt crust formation process of irrigation water treatment with different initial salt concentrations and its influence mechanism on soil evaporation. Results show that with the increase in initial salt concentrations, the salt crust quickly formed on the soil surface, the coverage of salt crust on the soil surface increased, the increase in the soil surface temperature slowed, and the evaporation decreased under the same light intensity and exposure time. The relationship between the initial salt concentrations and cumulative evaporation could be expressed by a logarithmic function (R^2>0.90). With the increase in the initial salt concentrations, the inhibition efficiency of salt crust on soil evaporation increased from 24.14% (10 $g \cdot L^{-1}$) to 71.99% (250 $g \cdot L^{-1}$). The initial salt concentrations could significantly affect the formation process of salt crusts, thereby leading to a considerable difference in soil evaporation by changing the soil surface temperature.

Key words: initial salt concentration; salt crust; formation and development; soil surface temperature; soil evaporation